

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗПЕКИ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Білодід Євген Ігорович

УДК 621.039.542

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ЗМЕНШЕННЯ НАДЛИШКОВОГО
КОНСЕРВАТИЗМУ ПРИ АНАЛІЗІ БЕЗПЕКИ ЯДЕРНИХ УСТАНОВОК**

05.14.14 – Теплові та ядерні енергоустановки

**Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Державному підприємстві "Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки" Державної інспекції ядерного регулювання України та Національної академії наук України (м. Київ).

Науковий керівник:

кандидат технічних наук,
Ковбасенко Юрій Петрович,
зам. начальника відділу нейтронно-
фізичних процесів ядерних установок,
Державне підприємство
"Державний науково-технічний центр з
ядерної та радіаційної безпеки України".

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук,
професор,
Каденко Ігор Миколайович,
завідувач кафедри ядерної фізики
фізичного факультету,
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка;

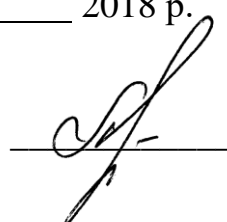
кандидат технічних наук,
Гальченко Віталій Володимирович
начальник відділу аналізу безпеки АЕС,
ТОВ "Інститут підтримки
експлуатації АЕС".

Захист відбудеться “18” червня 2018 р. о 14:00 годині, на засіданні спеціалізованої ради Д 27.201.01 в Інституті проблем безпеки АЕС Національної академії наук України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Лисогірська, 12.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту проблем безпеки АЕС Національної академії наук України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Лисогірська, 12.

Автореферат розісланий “ ____ ” _____ 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради, к.т.н., с.н.с.



Кучмагра О.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Донедавна при проведенні аналізу ядерної безпеки систем поводження з відпрацьованим паливом таке паливо розглядалося як свіже. Цей підхід є занадто консервативним і істотно завищує розрахункові розмножуючі властивості системи з вигорілим паливом, оскільки не враховує зменшення у ньому при вигорянні концентрації подільного матеріалу і накопичення поглинаючих нейтрони ізотопів. Застосування "підходу свіжого палива" істотно спрощує аналіз ядерної безпеки. Проте властивий йому надлишковий консерватизм, пов'язаний з відсутністю врахування зниження розмножуючих властивостей відпрацьованого палива в результаті експлуатації, призводить до суттєвого зменшення допустимої кількості відпрацьованих тепловиділяючих збірок, які можуть завантажуватись у контейнер чи сховище, внаслідок необхідності дотримання вимоги нормативних документів України щодо неперевищення коефіцієнтом розмноження нейтронів ($k_{\text{эф}}$) значення 0.95. Такий підхід забезпечує необхідний рівень ядерної безпеки, але суттєво збільшує економічні витрати.

На відміну від "підходу свіжого палива", при використанні якого необхідно провести тільки оцінку розмножуючих властивостей, врахування глибини вигоряння передбачає проведення попередніх досліджень ізотопного складу вигорілого палива. Після чого, з врахуванням оцінки точності його визначення та похибки розрахунку $k_{\text{эф}}$, обґрунтовується вибір певного переліку ізотопів, концентрація яких буде враховуватися в розрахунку $k_{\text{эф}}$ системи зберігання відпрацьованого ядерного палива (далі – ВЯП).

Відсутність науково-обґрунтованого підходу до виконання аналізу безпеки ядерних установок з врахуванням глибини вигоряння палива не дозволяє знизити надлишковий консерватизм, закладений у "підході свіжого палива", за рахунок більш реального моделювання паливних систем поводження з ВЯП. Вирішення цієї проблеми саме й визначає актуальність дисертаційної роботи, яка сприятиме зменшенню кількості радіоактивних відходів та фінансових витрат за рахунок оптимального використання матеріально-технічних та фінансових ресурсів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові дослідження за темою дисертації виконано відповідно до "Нової енергетичної стратегії України до 2035 року: "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність", затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України № 605р від 18 серпня 2017 року; "Загальнодержавної програми зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта "Укриття" на екологічно безпечну систему", затвердженої Законом України № 886-VI від 15 січня 2009 року; Закону України "Про поводження з відпрацьованим ядерним паливом при розміщенні, проектуванні та будівництві централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій" № 4384-VI від 9 лютого 2012 року; Комплексної (зведеної) програми підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних електростанцій, затвердженої постановою Кабінету

Міністрів України № 1270 від 7 грудня 2011 року; розпорядження Кабінету Міністрів України № 380-р від 7 червня 2017 року "Про затвердження проекту "Будівництво централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій"; розпорядження Кабінету Міністрів України № 269-р від 11 липня 2001 року "Про затвердження проекту "Чорнобильська АЕС. Проміжне сховище відпрацьованого ядерного палива (СВЯП-2)".

Основні теоретичні та практичні результати були отримані під час виконання наступних науково-дослідних робіт:

- "Development of Licensing and Inspection Capabilities. Task Order No.2 Conservatism in Assessment of Safety for the Transportation and Storage of Nuclear Fuel", Договір NRA-01/05-00 між ДНТЦ ЯРБ та органом регулювання ядерної та радіаційної безпеки України;
- "Впровадження принципу "burnup credit" в оцінках ядерної безпеки систем поводження з відпрацьованим паливом (контракт ВОА №125631, задача №14)" між ДНТЦ ЯРБ та Брукхевенською Національною лабораторією США;
- "Аналіз критеріїв безпеки з метою застосування принципу "burnup credit" для систем сухого зберігання відпрацьованого палива" (Державний реєстраційний № 0110U005935);
- "Розробка розрахункової моделі для визначення критичності відсіків басейну витримки сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП-1) ЧАЕС" (Державний реєстраційний № 0110U006226);
- "Розробка матеріалів з обґрунтування ядерної безпеки СВЯП-1" (Державний реєстраційний № 0107U002281);
- "Розрахункове обґрунтування ядерної безпеки СВЯП-1 з врахуванням глибини вигорання ВЯП Чорнобильської АЕС" (Державний реєстраційний № 0108U011188).

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення надійності і економічної ефективності експлуатації ядерних установок та зменшення кількості радіоактивних відходів.

Досягнення поставленої мети забезпечується виконанням послідовності таких задач:

- 1) аналіз сучасного досвіду використання глибини вигорання ядерного палива як фактору безпеки для реакторів PWR та BWR;
- 2) розробка комп'ютерних моделей для розрахунку ізотопного складу ВЯП і оцінки його розмножуючих властивостей, валідація програмного коду з відповідними бібліотеками нейтронно-фізичних констант та верифікація моделей на існуючих експериментальних даних та розрахункових бенчмарках;
- 3) дослідження впливу історії опромінення та технологічних характеристик на результати розрахункового аналізу розподілу вигорання та ізотопного складу ядерного палива зважаючи на його розмножуючі властивості;

- 4) визначення консервативного просторового розподілу ізотопного складу у ВЯП для забезпечення величини підкритичності систем поводження з ВЯП, яка вимагається нормативними документами;
- 5) вибір та обґрунтування переліку ізотопів для подальшого врахування в розрахунках критичності;
- 6) розробка науково-технічних основ для практичного впровадження результатів роботи в аналіз ядерної безпеки систем поводження з відпрацьованим ядерним паливом реакторів ВВЕР та РВПК.

Об'єкт дослідження – процес виконання аналізу ядерної безпеки систем поводження з ВЯП ядерних енергетичних установок з реакторами ВВЕР та РВПК.

Предмет дослідження – моделі та методи оцінки безпеки ядерних установок для поводження з ВЯП.

Методи дослідження

У роботі були використані:

- детерміністичні методи аналізу та порівняння даних, отриманих з літературних джерел, експериментів та розрахунків;
- метод комп'ютерного моделювання нейтронно-фізичних процесів у системах зберігання і транспортування ВЯП;
- аналітичний метод розв'язання рівнянь розрахунку ізотопного складу палива у комп'ютерному розрахунковому коді ORIGEN-S;
- імовірно-статистичний метод Монте-Карло, який використовується у вибраному комп'ютерному розрахунковому коді KENO-VI для аналізу критичності систем поводження з ВЯП;
- методи абстрагування та узагальнення при виконанні аналізу впливу умов експлуатації на розмножуючі властивості ВЯП, розробки консервативних профілів просторового розподілу вигорання.

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів підтверджується використанням сучасних, добре апробованих комп'ютерних кодів та математичного апарату. Основні результати підтверджені багаторічною практикою виконання перехресних, порівняльних, повірочних розрахунків під час здійснення науково-дослідної та експертної діяльності. Усі наведені у дисертаційній роботі результати не суперечать відомим фізичним законам.

Наукова новизна отриманих результатів.

Наукове значення отриманих результатів полягає в тому, що отримані наукові положення, висновки та рекомендації сприяють розвитку і вдосконаленню аналізу безпеки ядерних установок, а саме:

- вперше для впровадження врахування глибини вигорання ядерного палива при аналізі ядерної безпеки систем поводження з ядерним паливом реакторів ВВЕР та РВПК виконано комплексний аналіз, який включає:
 - визначення дефіцитів безпеки;
 - розробку шляху вирішення проблеми у вигляді врахування глибини вигорання палива;

- обґрунтування прийнятності та консервативності запропонованого рішення;
 - впровадження врахування глибини вигорання в аналіз ядерної безпеки систем поводження з ВЯП.
- на основі дослідження ізотопного складу відпрацьованого палива та встановлення похибки його визначення за експериментальними значеннями для окремих ізотопів вперше обґрунтовано перелік ізотопів для використання при врахуванні глибини вигорання в аналізі ядерної безпеки систем поводження з паливом реакторів ВВЕР та РВПК;
 - вперше виконано дослідження впливу параметрів експлуатації і характеристик палива на ізотопний склад та розмножуючі властивості ВЯП, обґрунтування консервативності використання середніх параметрів експлуатації палива (концентрація борної кислоти, температури палива та води тощо) за рахунок врахування певного переліку ізотопів у відпрацьованому паливі;
 - вперше проведено дослідження впливу просторового розподілу вигорання на розмножуючі властивості відпрацьованого палива. На основі результатів цих досліджень запропоновані консервативні аксіальні розподіли вигорання у паливних касетах реакторів ВВЕР та РВПК;
 - вперше виконано обґрунтування консервативності використання запропонованого набору ізотопів при виконанні аналізу ядерної безпеки систем поводження з ВЯП реакторів ВВЕР та РВПК;
 - вдосконалений та отримав подальший розвиток аналіз ядерної безпеки систем поводження з ВЯП з врахуванням глибини вигорання палива;
 - розроблені розрахункові комп'ютерні програми для виконання аналізу ядерної безпеки систем поводження з паливом реакторів ВВЕР-1000 та РВПК-1000 з врахуванням глибини вигорання палива та аксіального розподілу вигорання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні наукової бази та інструментарію для проведення аналізу безпеки та підходів до їхнього застосування у сфері використання ядерної енергії. Розроблені основи врахування глибини вигорання палива дозволяють зменшити кількість радіоактивних відходів та підвищити надійність та економічність експлуатації ядерних установок завдяки оптимальному використанню матеріально-технічних і фінансових ресурсів.

Розроблені науково-технічні основи врахування глибини вигорання відпрацьованого ядерного палива узгоджені органом регулювання ядерної та радіаційної безпеки України як основа для розробки аналізу безпеки окремих систем поводження з ВЯП українських АЕС і модернізації діючих у цій сфері регулюючих документів з точки зору обґрунтованого зниження їхнього консерватизму, і використовуються для палива реакторів ВВЕР-1000 при

аналізі ядерної безпеки завантаження контейнерів сухого сховища ВЯП (ССВЯП) ВКЗ-ВВЕР на Запорізькій АЕС з 2004 року внаслідок погодження органом регулювання ядерної та радіаційної безпеки України технічного рішення №00.ОБ.УУ.Тр.7615 "Про використання вигорання ядерного палива ВВЕР-1000 в якості параметра, який забезпечує ядерну безпеку при реалізації паливних завантажень ВКЗ ССВЯП ЗАЕС (постійна експлуатація)" листом № 12-11/6558 від 14.12.2004. Також, результати цієї роботи були використані при виконанні експертних оцінок ядерної безпеки упаковок ТУК-6 для відпрацьованого палива реакторів ВВЕР-440 у 2003 році (лист НАЕК "Енергоатом" № 2690/05 від 28.03.2003 інв.№001064) та при аналізі можливості врахування глибини вигорання ядерного палива у басейнах витримки реакторів ВВЕР-1000. На підставі розробленого врахування глибини вигорання палива реакторів РВПК-1000, починаючи з 2009 року виконується аналіз ядерної безпеки сховища СВЯП-1 Чорнобильської АЕС (рішення Колегії органу регулювання ядерної та радіаційної безпеки України № 27 від 24 грудня 2009 року).

Особистий внесок здобувача. Автору належать основні ідеї та підходи щодо:

- створення розрахункових моделей;
- вибору бібліотеки нейтронно-фізичних констант і оцінки розмножуючих властивостей відпрацьованого палива;
- виконання консервативного аналізу ядерної безпеки при врахуванні зміни ізотопного складу;
- виконання та узагальнення результатів розрахункових досліджень консервативності вибраних підходів до аналізу ядерної безпеки;
- виконання розрахункового аналізу впливу різних параметрів експлуатації тепловиділяючих збірок в активній зоні на розмножуючі властивості касет після вивантаження з реактора;
- аналізу впливу розроблених основ врахування глибини вигорання на результати оцінок ядерної безпеки систем зберігання і транспортування ядерного палива в Україні;
- розробки програмних засобів для аналізу ядерної безпеки зберігання відпрацьованого палива з врахуванням глибини вигорання палива у сховищах ССВЯП ВКЗ-ВВЕР Запорізької АЕС і СВЯП-1 Чорнобильської АЕС відповідно до розроблених науково-технічних основ врахування глибини вигорання.

Усі основні положення, результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи отримані автором особисто.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались й обговорювались на:

- Сьомій міжнародній конференції з ядерної безпеки ICNC'2003 (м.Токаї, Японія, 20-24 жовтня 2003р.);

- Міжнародній конференції щодо поводження з відпрацьованим паливом та радіоактивними відходами "Radioactive Waste and Spent Fuel Management" (м.Пловдив, Болгарія, 6-8 листопада 2003р.);
- Третій міжнародній науково-практичній конференції з проблем атомної енергетики "Надійність і безпека експлуатації АЕС" (м.Севастополь, Україна, 21-26 вересня 2004р.);
- Робочій зустрічі W112 "Учёт выгорания ядерного топлива при обосновании безопасности и "Burnup Credit" (м. Нововороніж, Російська Федерація, 6-9 грудня 2005р.);
- 16-му Міжнародному симпозиумі АЕР (м.Братислава, Словаччина, 25-29 вересня 2006р.);
- Міжнародній зустрічі "IAEA Regional Workshop on Criticality Safety / Burnup Credit (BUC) in Spent Fuel Handling and Storage" (м.Прага, Чехія, 19 – 23 березня 2007р.);
- 17-му Міжнародному симпозиумі АЕР (м.Ялта, Україна, 24 - 28 вересня 2007р.);
- Міжнародній конференції "Training Meeting / Workshop on Burnup Credit Criticality Calculation Methods and Applications" (м.Пекін, Китай, 25-28 жовтня 2011р.);
- Дев'ятій міжнародній науково-практичній конференції з проблем атомної енергетики "Надійність і безпека експлуатації АЕС" (м.Севастополь, Україна, 4–9 жовтня 2011 р.).

Публікації. Матеріали, наведені в дисертації, містяться у 14 публікаціях, з яких 8 - у спеціалізованих фахових виданнях, які входять до переліку, затвердженого ДАК МОН України, та 5, які входять до бази цитування Scopus.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів і висновків. Робота викладена на 166 сторінках машинописного тексту та містить 46 рисунків, 14 таблиць, список літератури з 135 найменувань на 15 сторінках. У додатках містяться акти використання результатів дисертаційної роботи та довідка, видана органом регулювання ядерної та радіаційної безпеки України.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми роботи і показано її зв'язок з науковими програмами, планами, темами; сформульовані мета і задачі дослідження; показана наукова новизна отриманих результатів та їхнє практичне значення.

Перший розділ містить огляд і аналіз міжнародних та українських сучасних підходів та регулюючих вимог щодо врахування зміни ізотопного складу ядерного палива при обґрунтуванні безпеки. На основі виконаного аналізу літературних джерел зроблені наступні висновки:

- у теперішній час для відпрацьованого палива реакторів PWR та BWR набули широкого поширення рекомендації щодо використання в

аналізі безпеки ізотопного складу опроміненого ядерного палива шляхом врахування концентрації певного числа нуклідів;

- за минулий період у розвинених країнах накопичено значний обсяг даних розрахункового аналізу і експериментальних досліджень ізотопного складу опроміненого ядерного палива, переважно реакторів PWR та BWR;
- в Україні відсутні установки для визначення ізотопного складу опроміненого ядерного палива, тому єдиним доступним способом визначення ізотопного складу є розрахунковий метод;
- незважаючи на те, що у СРСР існувала експериментальна та теоретична база, роботи з врахування ізотопного складу відпрацьованого палива при аналізі ядерної безпеки не проводилися;
- важливою складовою врахування ізотопного складу відпрацьованого палива в аналізі безпеки систем поводження з відпрацьованим паливом реакторів PWR та BWR є оцінка похибок моделювання, розрахункового коду та бібліотеки нейтронних перерізів, оскільки для визначення згаданих похибок у західних країнах є достатня кількість експериментальних даних. Для палива реакторів ВВЕР та РВПК, які є в Україні, такі дані відсутні чи дуже малочисельні;
- підхід щодо врахування ізотопного складу опроміненого палива при аналізі ядерної безпеки був дозволений нормативними документами України, але до початку цих робіт через відсутність необхідного науково обґрунтованого підходу не використовувався на практиці.

Під час ліцензування об'єктів поводження з ВЯП України гостро постала науково-методична проблема відсутності наукового обґрунтування (основи) та розробленого підходу до використання глибини вигоряння палива під час аналізу ядерної безпеки систем поводження з ВЯП.

Внаслідок обмеженої кількості експериментальних результатів, прийнятних для валідації розрахункових даних щодо ізотопного складу ВЯП реакторів ВВЕР та РВПК, які наразі використовуються в Україні, запропоновано та обґрунтовано врахування у складі відпрацьованого палива такого переліку ізотопів, який дозволив перевищити вплив невизначеностей, пов'язаних з оцінкою ізотопного складу ВЯП, на коефіцієнт розмноження нейтронів системи поводження з ВЯП.

На основі аналізу сучасного міжнародного досвіду використання глибини вигоряння ядерного палива як фактору безпеки (англ. "burnup credit") та виходячи з вищезазначеного, для реалізації в Україні методології "burnup credit" в оцінках безпеки систем поводження з ВЯП ВВЕР та РВПК необхідно було виконати наступне:

- вибрати розрахунковий код і бібліотеку нейтронно-фізичних констант для розрахункової оцінки ізотопного складу ВЯП та k_{ef} ; розробити розрахункові моделі для розрахунку ізотопного складу ВЯП і оцінки його розмножуючих властивостей, провести валідацію програмного коду і бібліотеки нейтронно-фізичних констант та верифікацію

розроблених моделей на експериментальних даних та розрахункових бенчмарках; оцінити похибки визначення $k_{\text{эф}}$ вибраним розрахунковим кодом з використанням експериментальних даних щодо критичних систем з паливом ВВЕР і РВПК;

- дослідити вплив історії опромінення і технологічних характеристик ядерного палива на результати розрахункового аналізу його ізотопного складу та розмножувачих властивостей; на основі цього розробити підхід до визначення консервативних значень концентрацій вибраних ізотопів у залежності від глибини вигорання палива для використання підходу "burnup credit";
- визначити консервативний просторовий розподіл ізотопного складу у відпрацьованому паливі реакторів ВВЕР та РВПК;
- обґрунтувати прийнятність та консервативність вибраного переліку ізотопів для його використання у розрахунках критичності;
- розробити науково обґрунтований підхід щодо врахування глибини вигорання ВЯП як фактору безпеки об'єктів поводження з ВЯП.

Вирішенню цих питань присвячені розділи 2 та 3 дисертації.

Другий розділ присвячений вибору програмного коду та бібліотеки нейтронно-фізичних констант для розрахунку ізотопного складу й оцінки розмножувачих властивостей відпрацьованого палива, проведенню робіт з валідації програмного коду і бібліотеки нейтронно-фізичних констант на існуючих експериментальних даних. Виконанню поставлених задач передувала розробка відповідних розрахункових моделей.

Підсумовуючи виконану роботу, можна зазначити наступне.

Для виконання досліджень, результати яких представлені у даній роботі, був вибраний пакет розрахункових кодів SCALE, який добре відомий і поширений у світі, і який містить інструменти для підготовки бібліотек перерізів, стандартні нейтронно-фізичні бібліотеки та коди для розрахунку ізотопного складу та розмножувачих властивостей паливних систем.

Отриману величину максимальної похибки розрахунку $k_{\text{эф}}$ у 1.1% слід розглядати в даній роботі як підтвердження кваліфікації розрахункового пакету SCALE для оцінки критичності систем поводження з паливом ВВЕР-1000. Використовувати її безпосередньо в оцінках ядерної безпеки з врахуванням глибини вигорання палива некоректно з наступних причин:

- оцінка точності визначення ізотопного складу виконана на підставі відносно невеликої кількості експериментів із застарілими типами палива;
- оцінка систематичної похибки комп'ютерного коду виконана за даними невеликого числа критичних експериментів з використанням свіжого палива;
- зазвичай відсутня інформація щодо просторового розподілу глибини вигорання палива;
- відсутні дані щодо кривизни відпрацьованих ТВЗ (далі - ВТВЗ);
- неповні дані з історії експлуатації ВТВЗ.

У зв'язку з вищезазначеним, врахування глибини вигорання для палива ВВЕР та РВПК в Україні може бути реалізоване не на основі достовірної оцінки всіх складових похибки визначення коефіцієнта розмноження нейтронів, а на основі визначення таких параметрів моделі та їхніх просторових розподілів, які призводять до максимальних значень $k_{\text{эф}}$, а саме: консервативних параметрів експлуатації ТВЗ у реакторі, консервативних параметрів виробництва палива, консервативного просторового розподілу вигорання.

У **третьому розділі** наведено обґрунтування врахування зміни ізотопного складу палива при проведенні оцінки розмножуючих властивостей опроміненого ядерного палива реакторів ВВЕР та РВПК у вигляді науково обґрунтованого підходу до врахування глибини вигорання ВЯП як фактору безпеки об'єктів поводження з ВЯП.

Розроблений підхід полягає в обґрунтуванні використання в аналізі ядерної безпеки систем поводження з відпрацьованим паливом певного переліку ізотопів з багатьох наявних у опроміненому паливі, який компенсує можливі неточності визначення глибини вигорання і похибки визначення зміни ізотопного складу ВЯП у залежності від вигорання, а також перевершує похибку визначення коефіцієнту розмноження нейтронів, яка виникає внаслідок варіації умов експлуатації ТВЗ у реакторі. Додатковий консерватизм може бути накладений шляхом використання отриманих консервативних аксіальних розподілів вигорання.

Нижче викладені основні результати виконаного обґрунтування.

Для проведення аналізу критичності відпрацьованого ядерного палива необхідно визначити, які зміни відбуваються в ізотопному складі і, відповідно, нейтронно-фізичних характеристиках палива при вигоранні, і як вони впливають на розмножуючі властивості відпрацьованого палива. Таке завдання вирішується шляхом класифікації нуклідів за впливом на розмножуючі властивості опроміненого палива.

Автором були проведені дослідження поглинаючих властивостей ізотопів, які містяться у відпрацьованому паливі (рисунок 1). Отримані значення були розраховані шляхом моделювання опромінення палива реактору ВВЕР-1000 з початковим збагаченням 4.4%. Ізотопи з часткою поглинання менше 1% на рисунку 1 не показані. Як видно на наведеному рисунку, зі збільшенням глибини вигорання істотно зменшується частка поглинання нейтронів ^{235}U за рахунок накопичення ізотопів Pu. Після припинення опромінення (вивантаження з реактору), розподіл поглинання практично не змінюється за винятком переходу ^{241}Pu у ^{241}Am (період напіврозпаду 14.35 років). При подальшому збільшенні часу витримки відбувається зростання частки ^{237}Np за рахунок α -розпаду ^{241}Am (період напіврозпаду 432.2 років).

Попередні результати досліджень ізотопного складу ВЯП реакторів ВВЕР та РВПК показали, що для окремих актинідів зміни концентрації ізотопів за однакової глибини вигорання можуть сягати 50%. Ці відмінності визначаються технологічними допусками при виготовленні касети й умовами її експлуатації в

активній зоні (концентрацією борної кислоти, потужністю, розташуванням касети відносно поглинаючих стрижнів, викривленням касети тощо).

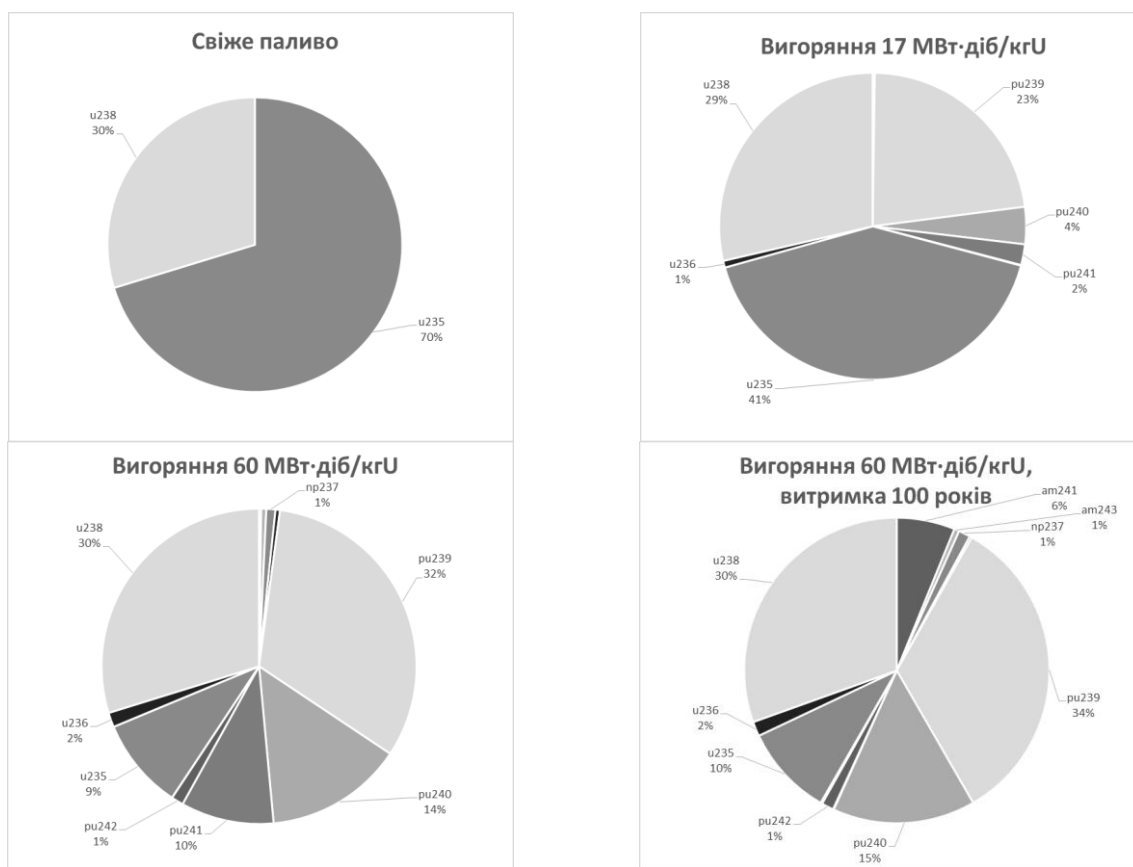


Рисунок 1 – Частка поглинання нейтронів на вибраних актинідах у залежності від глибини вигорання палива ВВЕР-1000

Обґрунтування розроблених основ врахування зміни ізотопного складу палива відбувається наступним шляхом:

- 1) виконується оцінка впливу експлуатаційних параметрів реактора на ізотопний склад палива; визначається консервативний (з точки зору величини коефіцієнта розмноження нейтронів при зберіганні) набір параметрів і відповідний до нього консервативний ізотопний склад палива;
- 2) вибирається та обґрунтовується перелік ізотопів у складі ВЯП, які пропонується використовувати при аналізі ядерної безпеки;
- 3) обґрунтовується, що врахування вибраного переліку ізотопів у ВЯП призводить до завищення $k_{\text{эф}}$ на більшу величину (тобто є більш консервативним), ніж врахування допусків та експлуатаційних параметрів разом із врахуванням похибок розрахункового коду і бібліотеки нейтронно-фізичних констант;
- 4) виконується оцінка впливу нерівномірності розподілу вигорання по ВТВЗ на коефіцієнт розмноження нейтронів при зберіганні палива; визначається консервативний розподіл вигорання;
- 5) як результат, пропонується використовувати при аналізі ядерної безпеки ВЯП вибраний набір ізотопів у поєднанні з вибраним

профілем розподілу вигорання по ВТВЗ, оскільки такий підхід дозволяє не враховувати історію опромінення кожної ВТВЗ та варіацію експлуатаційних параметрів під час опромінення.

Для визначення консервативного ізотопного складу ВЯП зважаючи на критичність системи зберігання ВЯП, розглядався вплив на коефіцієнт розмноження нейтронів наступних експлуатаційних та технологічних факторів:

- наявність чи відсутність поглинаючих стрижнів;
- концентрація борної кислоти;
- енерговиділення ТВЗ;
- густина та температура теплоносія;
- середня температура палива;
- технологічні допуски на виготовлення паливних таблеток (густина та збагачення палива);
- товщина шару води між касетами.

Для кожного з перелічених параметрів (у межах можливих його змін) визначалось значення, яке призводить до збільшення $k_{\text{эф}}$ системи зберігання ВЯП. Така сукупність параметрів складає консервативний набір параметрів виготовлення та експлуатації ТВЗ, який призводить до консервативного ізотопного складу ВЯП.

Порівняння коефіцієнтів розмноження нейтронів для нескінченної ґратки системи зберігання (k_{∞}), завантаженої вигорілими ТВЗ одного типу палива, які відрізняються двома різними умовами опромінення в активній зоні реактора (за середніх та консервативних параметрів експлуатації активної зони), для різних глибин вигорання наведено на рисунку 2.

Для вибору нуклідів, якими можна змоделювати поведінку відпрацьованого ядерного палива, зазвичай використовують такі критерії:

- враховуються всі подільні нукліди;
- нукліди повинні мати істотний внесок у поглинання теплових нейтронів у відпрацьованому паливі;
- нукліди повинні бути зафіксовані у паливній матриці (летючі елементи не враховуються);
- повинні бути експериментальні дані аналізу ізотопного складу для вибраного типу реактора для порівняння з розрахунковою концентрацією обраних нуклідів.

На підставі проведених розрахунків, аналізу міжнародного досвіду та доступних літературних джерел для палива реакторів ВВЕР та РВПК було прийнято при визначенні розмножуючих властивостей ВТВЗ враховувати зниження сумарного вмісту наступних ізотопів (приймаючи до уваги вигорання, напрацювання і радіоактивний розпад):



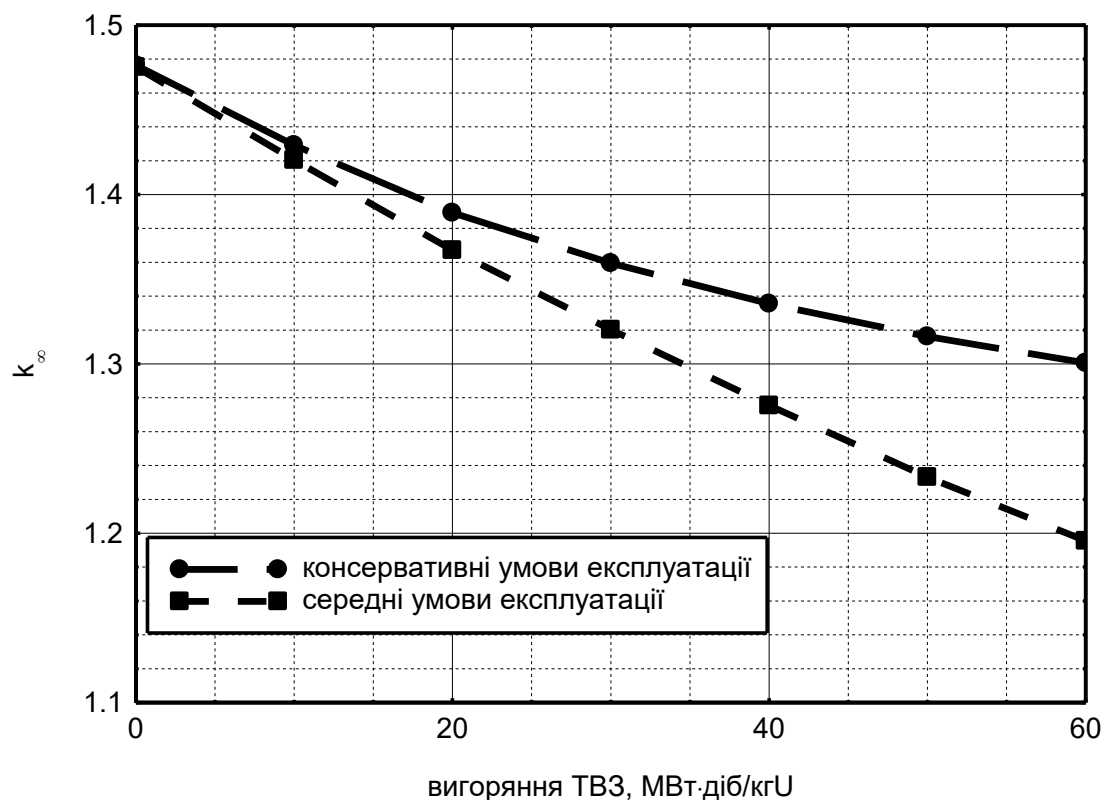


Рисунок 2 – Порівняння розмножуючих властивостей ТВЗ реактору ВВЕР-1000 при зберіганні за різних умов експлуатації у реакторі

Зміна їхнього вмісту у паливі ВВЕР-1000 з початковим збагачення 4.4% під час опромінення у реакторі за середніх умов експлуатації наведена нижче на рисунку 3.

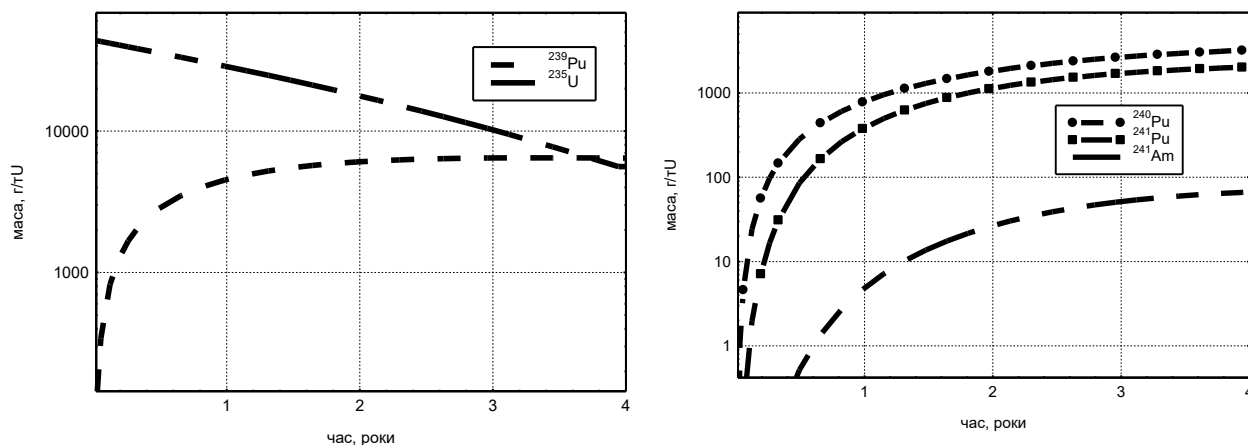


Рисунок 3 – Зміна вмісту вибраних ізотопів під час опромінення палива у реакторі ВВЕР-1000 за середніх умов експлуатації

Використання консервативних умов порівняно із середніми умовами експлуатації ТВЗ у реакторі зважаючи на ядерну безпеку їхнього зберігання призводить до збільшення k_{∞} на 3% при глибині вигоряння 30 МВт·діб/кгU і на 10.4% при глибині вигоряння 60 МВт·діб/кгU (рисунок 4). У той же час, використання в аналізі вибраних п'яти ізотопів призводить за середніх умов

експлуатації до завищення k_{∞} на 8.4% при глибині вигорання 30 МВт·діб/кгU і на 16.3% при глибині вигорання 60 МВт·діб/кгU. Запропоновані припущення дозволяють компенсувати невизначеність розрахунку коефіцієнта розмноження нейтронів навіть з урахуванням похибок розрахункового коду і бібліотеки нейтронно-фізичних констант (оцінене максимальне значення 1.1%), рисунок 4.

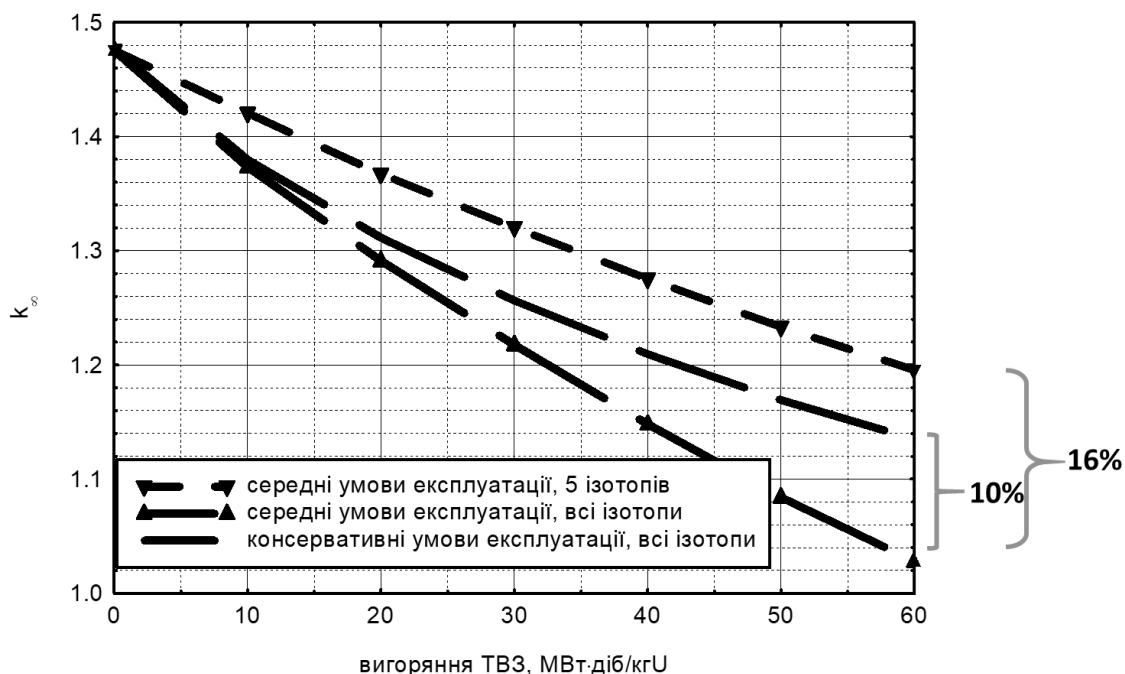


Рисунок 4 – Порівняння розмножуючих властивостей ТВЗ ВВЕР-1000 при зберіганні

Таким чином, консерватизм, який полягає у використанні певного переліку ізотопів з багатьох наявних в опроміненому паливі, компенсує можливі неточності визначення глибини вигорання і похибки визначення зміни ізотопного складу ВЯП у залежності від вигорання, а також перевершує похибку визначення коефіцієнту розмноження нейтронів, яка виникає внаслідок варіації можливих умов експлуатації ТВЗ у реакторі.

Всі попередні розрахунки проводились без врахування аксіального розподілу вигорання у ВТВЗ. Наступним суттєвим питанням при врахуванні вигорання як фактору безпеки є питання нерівномірності розподілу вигорання по довжині ТВЗ. Як показали проведені у дисертаційній роботі дослідження, при однаковій середній глибині вигорання у залежності від його розподілу по довжині ВТВЗ коефіцієнт розмноження нейтронів може коливатися у межах 6%.

На початку експлуатації ТВЗ близький до косинусоїдального аксіальний профіль щільності потоку нейтронів призводить до більш швидкого вигорання ТВЗ у центральній частині, ніж на кінцях. Через це використання при аналізі критичності зберігання ВЯП рівномірного профілю вигорання, який дорівнює середній глибині вигорання ТВЗ, не завжди буває консервативним.

Для розрахунку коефіцієнта розмноження нейтронів може застосовуватися три консервативні способи врахування нерівномірності аксіального розподілу вигорання по ВТВЗ:

- 1) для кожної ТВЗ вигорання приймається незмінним по висоті і рівним середньому значенню між глибиною вигорання нижнього і верхнього (найменш вигорілих) шарів ТВЗ;
- 2) для кожного шару ТВЗ вигорання приймається відповідно до результатів розрахунку нейтронно-фізичних програм підтримки експлуатації;
- 3) для певного числа ТВЗ формується консервативний профіль вигорання.

Використання першого, найбільш простого, підходу, призводить до заниження глибини вигорання ТВЗ у 1.5 - 2.5 рази порівняно до його середнього значення, і як наслідок - надмірного завищення коефіцієнта розмноження нейтронів відпрацьованого палива (на 10-20%).

Другий підхід є найбільш реалістичним, але трудомістким, і підвищує вплив людського фактору (збільшує імовірність помилки).

Третій підхід є перехідним між першим та другим і дозволяє значно знизити їхні недоліки. Автором було досліджено ~1800 профілів вигорання ТВЗ у басейнах витримки (далі - БВ) енергоблоків Запорізької АЕС, у результаті чого був сформований консервативний профіль розподілу вигорання у 10 шарах. Запропонований розподіл вигорання призводить до максимального коефіцієнту розмноження нейтронів для всіх розглянутих ТВЗ і всіх точок по вигоранню (перевищення k_{ef} над реальним складає 1-1.5%).

Для розглянутих ТВЗ були побудовані профілі розподілу вигорання (рисунок 5, зліва). Потім, для кожного з 10 шарів по висоті всіх ТВЗ вибиралися мінімальні значення коефіцієнтів нерівномірності вигорання, які і склали консервативний аксіальний відносний розподіл глибини вигорання для всіх розглянутих ТВЗ.

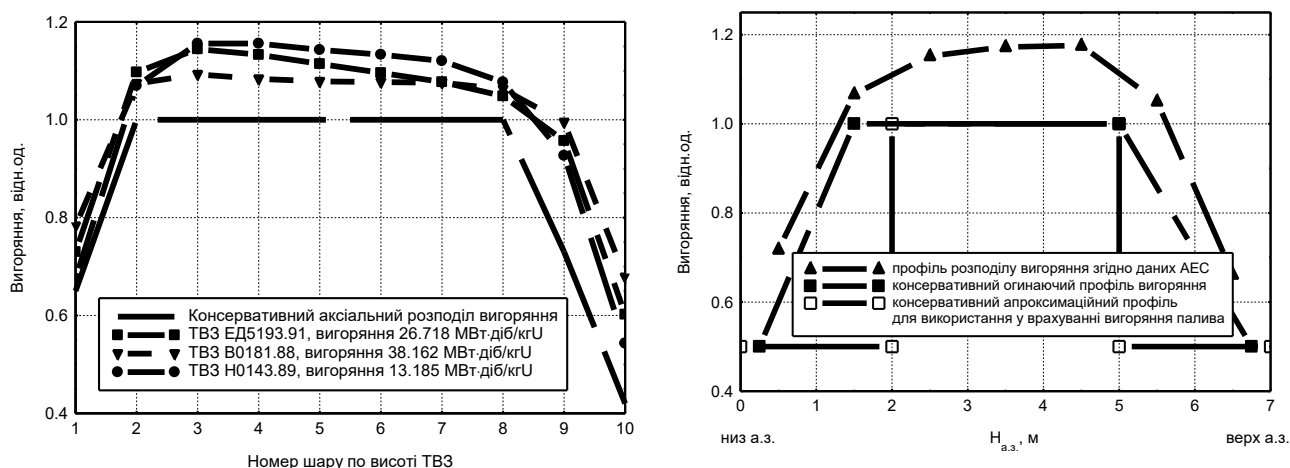


Рисунок 5 – Відносні розподіли вигорання по висоті різних касет: ВВЕР-1000 (зліва) та РВПК-1000 (справа)

Аналогічним чином був побудований консервативний триступеневий розподіл вигорання для касет РВПК-1000, показаний на рисунку 5 справа. Для його розрахункової реалізації виконано розбиття касети на 3 ділянки по висоті: дві кінцевих, кожна довжиною по 2 метри, і центральна, довжиною 3 метри. На

кінцевих ділянках вигоряння приймається рівним 50% від середньої величини глибини вигоряння касети. На середній ділянці вигоряння приймається рівним середньому значенню у касеті. Фактично, такий підхід призводить до заниження середньої глибини вигоряння ТВЗ на 2/7.

Використання консервативного розподілу вигоряння гарантує, що ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів буде завжди дещо більше реального.

У **четвертому розділі** наведено приклади застосування розроблених основ врахування глибини вигоряння при аналізі ядерної безпеки систем зберігання і транспортування ВЯП в Україні.

Першою в Україні установкою поводження з відпрацьованим паливом, для якої було використане врахування глибини вигоряння у якості фактору безпеки при виконанні оцінок критичності є сухе сховище відпрацьованого ядерного палива (ССВЯП) на Запорізькій АЕС. Основним елементом сховища є контейнери, аналоги яких (VSC-24) давно використовуються у США для ВЯП реакторів PWR. Однак, у процесі аналізу безпеки цих контейнерів для палива ВВЕР-1000 Запорізької АЕС без врахування глибини вигоряння палива були виявлені певні проблеми у частині забезпечення ядерної безпеки.

Для аналізу безпеки ССВЯП Запорізької АЕС з використанням підходу "burnup credit" для ВТВЗ був прийнятий рівномірний профіль розподілу вигоряння, за якого глибина вигоряння ВЯП дорівнює середньому значенню вигоряння кінцевих ділянок ВТВЗ. За таких умов для дотримання критерію $k_{\text{эф}} \leq 0.95$ середня глибина вигоряння кінцевих ділянок реальних ВТВЗ початкового збагачення 4.4% повинна сягати 50 МВт·діб/кгU, що недосяжно для сучасних типів палива.

Використання тільки поглиначів (використаних стрижнів СУЗ) у кожній ВТВЗ так само не дозволяло знизити значення $k_{\text{эф}}$ до рівня 0.95 при повному завантаженні контейнера зберігання. Тому при аналізі безпеки завантаження контейнерів сховища ССВЯП на Запорізькій АЕС використовується комплексний підхід, що поєднує запропоноване у дисертації врахування глибини вигоряння палива реакторів ВВЕР-1000 з використанням додаткових поглиначів (відпрацьованих кластерів СУЗ та поглинаючих вставок).

На рисунку 6 наведено типове завантаження контейнерів ССВЯП, при якому у 10-12 ВТВЗ встановлюються відпрацьовані кластери СУЗ, у інші – кластери СВП. Врахування глибини вигоряння дозволяє знизити розрахункове значення $k_{\text{эф}}$ за оптимальних умов уповільнення в даному випадку від неприйняттого значення $k_{\text{эф}}=0.97$ до величини $k_{\text{эф}}=0.91$, яка нижче допустимого значення 0.95.

Врахування в аналізі безпеки систем поводження з ВЯП лише п'яти паливних ізотопів застосовувалося також для аналізу ядерної безпеки транспортних упаковок ТУК-6 для ВЯП реакторів ВВЕР-440 та відсіків БВ реакторів ВВЕР-1000.

Ще одним прикладом застосування запропонованого у дисертаційній роботі врахування глибини вигоряння в якості параметра ядерної безпеки є сховище СВЯП-1 Чорнобильської АЕС.

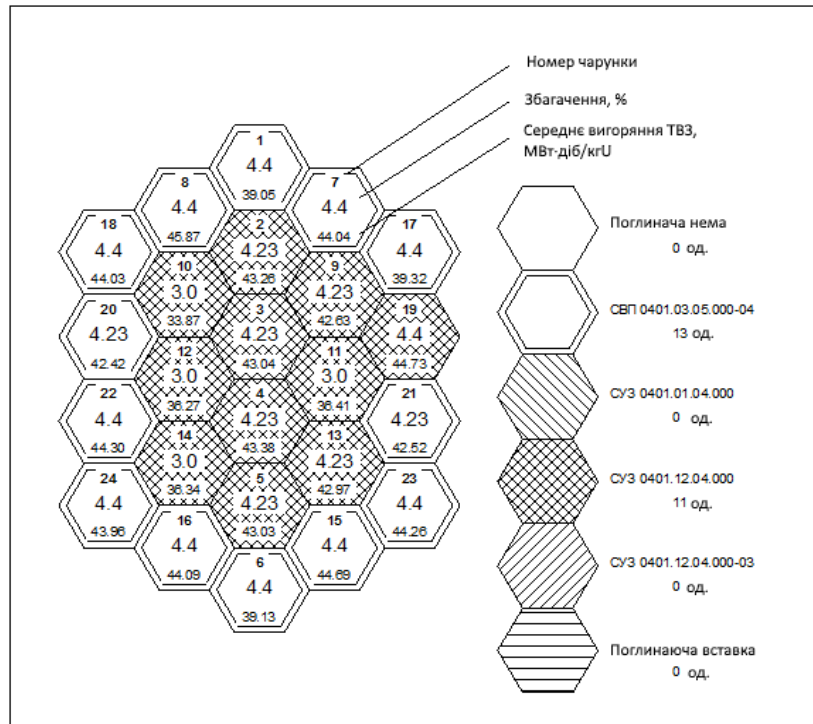


Рисунок 6 - Картограма завантаження контейнеру ССВЯП відпрацьованим паливом з енергоблоку №3 ЗАЕС у ППР-2008

Значна затримка введення в експлуатацію сховища СВЯП-2 призвела до більш активного використання у якості сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів РВПК-1000 наявне сховище СВЯП-1.

Проведений аналіз ядерної безпеки сховища без врахування глибини вигорання палива реакторів РВПК-1000 Чорнобильської АЕС виявив невідповідність вимогам нормативних документів України щодо підкритичності за умов оптимального уповільнення нейтронів. Виправлення становища стало можливе шляхом проведення більш реалістичних оцінок $k_{\text{эф}}$ з врахуванням глибини вигорання палива.

Кожний відсік БВ сховища СВЯП-1 містить приблизно 4380 ВТВЗ. З метою зменшення трудомісткості та імовірності помилки при моделюванні завантажень відсіків, була розроблена комп'ютерна програма для визначення критичності відсіків БВ СВЯП-1, яка дозволяє виконувати наступні операції:

- розрахунок ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів будь-якого відсіку БВ СВЯП-1 із завданням:
 - температури води і палива;
 - густини уповільнювача у пеналах і об'ємі відсіку БВ;
 - рівня води у відсіку БВ;
- розрахунок ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів відсіку БВ СВЯП-1 при виконанні транспортно-технологічних операцій з паливом (переміщення ВТВЗ з максимальними розмножуючими властивостями транспортним коридором) з врахуванням заданих параметрів середовища;

- перевантаження палива як всередині одного відсіку БВ, так і між різними відсіками.

У зв'язку з великою кількістю ВТВЗ, які зберігаються у відсіках БВ СВЯП-1 (до 17520 одиниць), для спрощення моделювання величина вигорання ВТВЗ розбивається на 5 інтервалів:

- в інтервалі 0 - 469 МВт·діб/ТВЗ глибина вигорання ВТВЗ приймається рівною 0 МВт·діб/ТВЗ (свіже паливо);
- в інтервалі 470 - 939 МВт·діб/ТВЗ глибина вигорання ВТВЗ приймається рівною 470 МВт·діб/ТВЗ;
- в інтервалі 940 - 1399 МВт·діб/ТВЗ глибина вигорання ВТВЗ приймається рівною 940 МВт·діб/ТВЗ;
- в інтервалі 1400 - 1869 МВт·діб/ТВЗ глибина вигорання ВТВЗ приймається рівною 1400 МВт·діб/ТВЗ;
- ≥ 1870 МВт·діб/ТВЗ глибина вигорання ВТВЗ приймається рівною 1870 МВт·діб/ТВЗ.

У результаті, всі штатні і регеновані ВТВЗ у завантаженні відсіку БВ розбиваються на групи, які мають одне з п'яти значень глибини вигорання:

0, 470, 940, 1400 або 1870 МВт·діб/ТВЗ.

Розроблений програмний модуль використовувався фахівцями Чорнобильської АЕС для виконання аналізу ядерної безпеки відсіків БВ СВЯП-1, а також для завантаження 5-го відсіку БВ, який до того часу не використовувався, паливом з блоків Чорнобильської АЕС (рисунок 7). Результати його використання увійшли до складу звіту з оцінки безпеки СВЯП-1 версії 3.01.

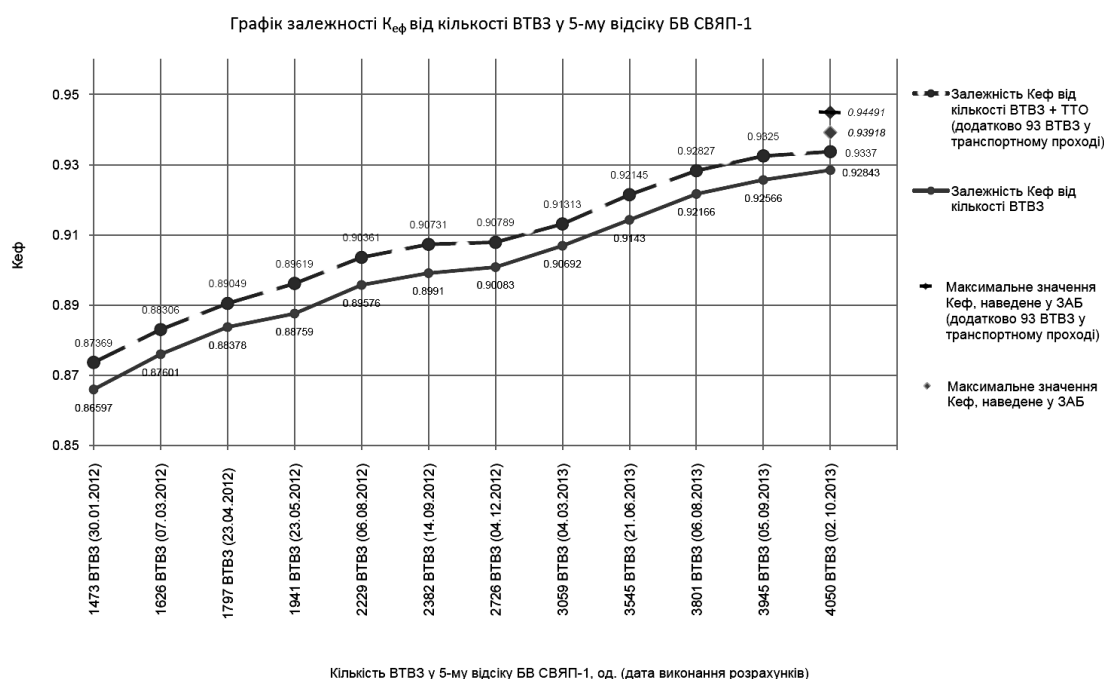


Рисунок 7 – Розмножуючі властивості 5-го відсіку басейну витримки СВЯП-1 Чорнобильської АЕС

Окрім наведених вище прикладів використання розроблених основ врахування глибини вигорання, вони постійно використовуються під час експертних та науково-дослідних робіт.

У п'ятому розділі наведені шляхи можливого подальшого вдосконалення запропонованого врахування глибини вигорання у якості параметра ядерної безпеки, які полягають у розширенні набору ізотопів, що враховуються при розрахунках розмножуючих властивостей ВЯП. Це може бути досягнуто шляхом:

- розширення набору актинідів;
і / або
- впровадження врахування продуктів поділу.

Попередньо було проведено порівняння розмножуючих властивостей ґраток паливних касет реакторів ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 з врахуванням 10ти ізотопів у залежності від їхнього вигорання за середніх та консервативних умов експлуатації у реакторі (рисунок 8).

У висновках сформульовані основні результати дисертації.

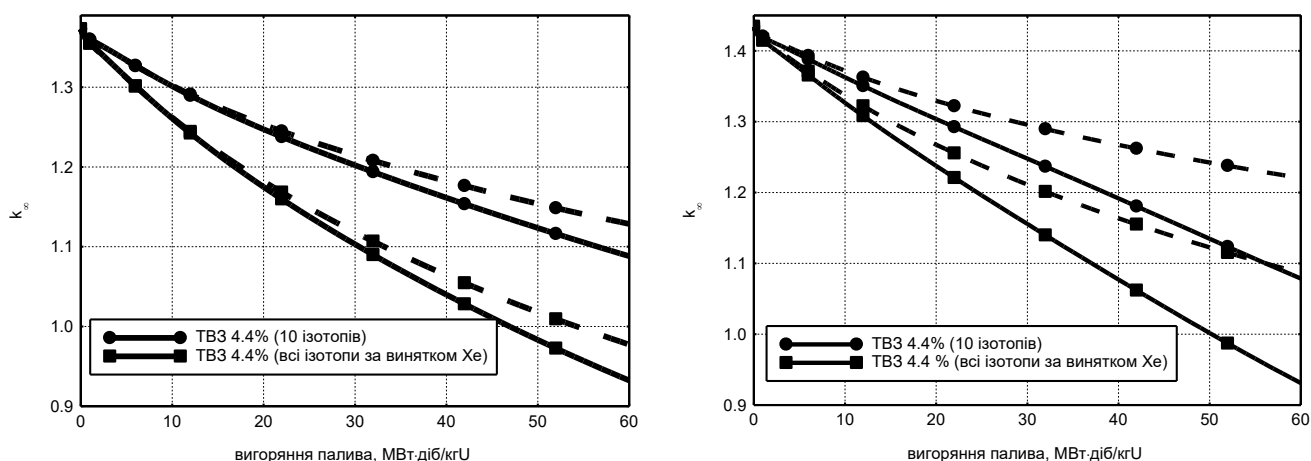


Рисунок 8 – Розмножуючі властивості ґраток паливних касет реакторів ВВЕР-440 (зліва) та ВВЕР-1000 (справа) з врахуванням 10ти ізотопів актинідів у залежності від їхнього вигорання

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить раніше не захищені наукові положення та отримані автором нові науково обґрунтовані результати, що складають основу врахування глибини вигорання палива у якості параметра безпеки для систем зберігання і транспортування палива реакторів ВВЕР та РВПК в Україні.

У представленій до захисту дисертаційній роботі показано, що надмірний консерватизм, який раніше закладався при аналізі ядерної безпеки систем зберігання і транспортування опроміненого ядерного палива, можна істотно знизити за рахунок більш реалістичного моделювання паливних систем. Якщо таке моделювання відбувається за допомогою сучасних обчислювальних засобів і даних, на базі більш повного розуміння процесів, які відбуваються у

паливних системах, то зняття надлишкового консерватизму не призводить до зниження рівня безпеки ядерно-небезпечних систем.

У результаті виконання поставлених у дисертаційній роботі задач вперше була виконана повна та цілісна науково-технічна робота: від аналізу розмножуючих властивостей ВЯП різного типу до розробки методичних підходів і впровадження врахування глибини вигорання палива в аналіз ядерної безпеки систем поводження з ВЯП. Розроблені підходи, моделі та рекомендації є прийнятними для всіх сховищ ВЯП реакторів ВВЕР-1000 та РВПК-1000 в Україні. Це дозволяє зробити висновок, що результати роботи можуть бути застосовані на всіх системах поводження з ВЯП зазначених типів реакторів, а розроблені підходи та рекомендації можуть бути основою для розробки обґрунтування врахування глибини вигорання палива будь-яких реакторів.

За результатами виконаної дисертаційної роботи можна сформулювати наступні висновки:

1. Вперше розроблені науково-технічні основи врахування глибини вигорання палива в аналізі ядерної безпеки систем поводження з відпрацьованим ядерним паливом реакторів ВВЕР та РВПК в Україні.
2. Розроблений підхід дозволяє використовувати середні параметри експлуатації палива у реакторі без моделювання історії опромінення кожної ТВЗ.
3. Вперше проведено всебічне дослідження впливу історії опромінення і технологічних характеристик ядерного палива реакторів ВВЕР і РВПК на його ізотопний склад та розмножуючі властивості під час зберігання у залежності від глибини вигорання.
4. Вперше визначено консервативний, відносно розмножуючих властивостей систем поводження з паливом, ізотопний склад ВЯП реакторів ВВЕР-1000 та РВПК-1000.
5. Вперше розроблений та обґрунтований консервативний просторовий розподіл вигорання у ВЯП реакторів ВВЕР-1000 та РВПК-1000 для забезпечення консерватизму оцінок критичності систем поводження з ВЯП, який вимагається нормативними документами України.
6. Вперше проведено обґрунтування застосовності вибраного переліку ізотопів і розподілу вигорання для їхнього врахування у розрахунках критичності.

Результати роботи знайшли застосування при обґрунтуванні ядерної безпеки систем зберігання ВЯП на ССВЯП ЗАЕС, що дозволило досягнути номінального завантаження контейнерів ВЯП та зменшити витрату додаткових поглиначів, і СВЯП-1 ЧАЕС, що дозволило вчасно вивантажити паливо з приреакторних БВ блоків ЧАЕС та продовжити виведення ЧАЕС з експлуатації (акти використання наведені у додатках до дисертації). Також, у додатку до дисертації наведено довідку органу регулювання ядерної та радіаційної безпеки України щодо вагомого внеску розроблених основ у галузь ядерної енергетики.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ковбасенко Ю.П. Консерватизм в оцінці ядерної безпеки систем поводження зі свіжим та відпрацьованим паливом / Ю.П. Ковбасенко, М.Л. Єременко, Є.І. Білодід, О.О. Дудка // Ядерна та радіаційна безпека. — 2002. — Спецвипуск. — С. 57—62.

Автором наведені основні тези обґрунтування врахування глибини вигорання ядерного палива в оцінці ядерної безпеки, яка розкрита у дисертації. Окреслений обсяг робіт, які потрібно виконати для впровадження обґрунтування.

2. Білодід Є.І. Впровадження методики обліку вигорання палива в практику оцінки ядерної безпеки при поводженні з відпрацьованим паливом / Є.І. Білодід, О.В. Горбаченко, О.І. Ігнатченко, Ю.П. Ковбасенко // Ядерна та радіаційна безпека. — 2004. — № 3. — С. 56—62.

Наведене обґрунтування врахування глибини вигорання, розрахунковим аналізом доведена можливість його використання для оцінки ядерної безпеки сховища ВЯП Запорізької АЕС.

3. Білодід Є.І. Тестування пакету програм SCALE (США) для оцінки критичності систем поводження з паливом реакторів РБМК / Є.І. Білодід, О.О. Дудка, Ю.П. Ковбасенко // Ядерна та радіаційна безпека. — 2005. — № 3. — С. 9—19.

Автор виконав розрахунковий аналіз прийнятності використання програмного комплексу SCALE для виконання аналізу ядерної безпеки паливних систем реакторів РВПК-1000.

4. Ковбасенко Ю.П. Впровадження сучасних методів оцінки ядерної безпеки систем поводження з відпрацьованим паливом на АЕС України / Ю.П. Ковбасенко, М.Л. Єременко, Є.І. Білодід, О.О. Дудка, Я.В. Костюшко // Ядерна та радіаційна безпека. — 2008. — № 1. — С. 17—21.

У публікації автор навів результати впровадження врахування глибини вигорання на СВЯП Запорізької АЕС, обґрунтував консервативність вибраного набору ізотопів.

5. Білодід Є.І. Аналіз ядерної безпеки систем зберігання ядерного палива українських АЕС з реакторами ВВЕР // Зб. наук. праць СНУЯЕтаП. — 2010. — №4(36) — С.14 – 23.

Автор виконав аналіз ядерної безпеки басейнів витримки АЕС України, визначив наявність дефіцитів безпеки та необхідність більш детального моделювання найбільш небезпечних умов зберігання палива.

6. Дудка О.О. Використання аксіального профілю розподілу вигорання при аналізі ядерної безпеки систем зберігання відпрацьованого ядерного палива реакторів ВВЕР в Україні / О.О. Дудка, Ю.П. Ковбасенко, Є.І. Білодід // Ядерна та радіаційна безпека. — 2012. — № 3(55). — С. 34—38.

У статті автором наведена концепція формування консервативного профілю вигорання відпрацьованого палива реакторів ВВЕР-1000, та доведена його консервативність і ефективність.

7. Ковбасенко Ю.П. Аналіз ядерної безпеки при розміщенні ТВЗА в пеналах СВДЗ енергоблоків ВВЕР-1000 АЕС України / Ю.П. Ковбасенко, О.О. Дудка, Я.В. Костюшко, Є.І. Білодід // Збірник наукових праць СНУЯЕтаП. — 2012. — №4(44) — С. 25 – 32.

Автор виконав детальний аналіз ядерної безпеки басейнів витримки АЕС України, в яких було виявлено дефіцит безпеки. Проаналізована та запропонована можливість використання врахування глибини вигорання палива серед можливих засобів та заходів щодо дотримання вимог нормативних документів України.

8. Білодід Є.І. Застосування врахування вигорання палива при обґрунтуванні ядерної безпеки сховища відпрацьованого палива СВЯП-1 ЧАЕС / Є.І. Білодід, Ю.П.Ковбасенко //Збірник наукових праць СНУЯЕтаП. — 2012. — № 2(42). — С. 9—17.

У статті автор навів результати впровадження і адаптації обґрунтування врахування глибини вигорання відпрацьованого палива для сховища палива реакторів РВПК-1000.

9. Kovbasenko Y. Modeling of Critical Experiments with Fuel of RBMK-1000 Reactor/Y. Kovbasenko, Y. Bilodid // Proceedings - ICNC'99, the Sixth International Conference on Nuclear Criticality Safety : September 20 - 24, 1999, Palais des Congrès, Versailles, France, pp.1095-1103.

Представлені результати виконання автором розрахунків критичних експериментів з паливом реакторів РВПК-1000 за допомогою програмного комплексу SCALE, визначена похибка при використанні різних бібліотек нейтронно-фізичних констант.

10. Validation of SCALE Sequence CSAS26 for Criticality Safety Analysis of VVER and RBMK Fuel Designs. NUREG/CR-6736, PNNL-13694/ Y.Kovbasenko, V.Khalimonchuk, A.Kuchin, Y.Bilodid, M.Yeremenko, O.Dudka - Richland, WA: PNNL, 2002.

Наведені результати виконаних автором розрахунків коефіцієнта розмноження нейтронів різноманітних паливних систем з паливом реакторів ВВЕР-1000 та РВПК-1000. Визначені прийнятність та похибка таких розрахунків за допомогою програмного комплексу SCALE.

11. Bilodid Y. Testing the SAS2H SCALE Control Module on VVER Type Fuel/Y.Bilodid, M.Yeremenko, Y.Kovbasenko - Proceedings of the Seventh International Conference on Nuclear Criticality Safety ICNC'2003, October 20 - 24, 2003, Tokai, Japan, pp. 700-705.

Автором наведені результати обчислення бенчмарків щодо визначення ізотопного складу відпрацьованого палива реакторів ВВЕР-440 та ВВЕР-1000. Визначені прийнятність та похибка таких розрахунків за допомогою програмного комплексу SCALE.

12. Kovbasenko Y. Comparative analysis of isotope composition of VVER 1000 spent fuel depending on their manufactory and operation conditions / Y.Kovbasenko, Y.Bilodid, M.Yeremenko. - Proceedings of the Seventh International Conference on Nuclear Criticality Safety ICNC'2003, October 20 - 24, 2003, Tokai, Japan, pp. 661-665.

У публікації автору належить характеристика параметрів експлуатації та вибір ізотопів для дослідження.

13. Yeremenko M. Preparation and Testing ORIGEN-ARP Library for WWER Fuel Design/M.Yeremenko, Y.Kovbasenko, Y.Bilodid - Proceedings of the Seventh International Conference on Nuclear Criticality Safety ICNC'2003, October 20-24, 2003, Tokai, Japan, pp.721-726.

У публікації автору належить збір та аналіз вихідних даних, створення моделей та виконання розрахунків за допомогою модуля SAS2H ізотопного складу відпрацьованого ядерного палива реакторів ВВЕР-440 та ВВЕР-1000.

14. Bilodid Y. Nuclear Safety Analysis for Transport Cask TK-6 (for VVER-440) and Cover for Fresh Assemblies (for VVER-1000) in Implementation of New Fuel Types at Ukrainian NPPs./ Yevgen Bilodid, Iurii Kovbasenko, Olena Dudka. - Proceedings of the 16th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety. September 25 - 29, 2006, Bratislava, Slovakia, pp.645-661.

Автором наведені результати розрахунків критичності завантаження упаковки для відпрацьованого палива реакторів ВВЕР-440. Наведено результати аналізу використання змішаних завантажень паливом різного початкового збагачення та врахування глибини вигорання ядерного палива.

АНОТАЦІЯ

Білодід Є. І. Науково-технічні основи зменшення надлишкового консерватизму при аналізі безпеки ядерних установок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.14 "Теплові та ядерні енергоустановки" (143 "Атомна енергетика"). Робота виконана у Державному підприємстві "Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки" Державної інспекції ядерного регулювання України та Національної академії наук України. Захист відбудеться у спеціалізованій вченій раді Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України, м. Київ, 2018.

Дисертація присвячена обґрунтуванню безпеки систем поводження з відпрацьованим паливом реакторів ВВЕР-440, ВВЕР-1000 та РВПК-1000 з врахуванням зміни розмножуючих властивостей ядерного палива в результаті його експлуатації без зниження існуючого рівня ядерної безпеки.

Розроблені та впроваджені науково-технічні основи використання глибини вигорання ВЯП як фактору безпеки при аналізі безпеки систем поводження з відпрацьованим паливом реакторів ВВЕР та РВПК для зниження надлишкового консерватизму, притаманного підходу, за якого все паливо вважається свіжим. Це дозволяє більш реально оцінити розмножуючі властивості опроміненого палива та, виходячи з цього, максимально заповнити систему поводження з паливом та зменшити необхідну кількість додаткових

поглиначів для підтримання регламентованого рівня підкритичності. Завдяки цьому знижується вартість поводження з ТВЗ та кількість радіоактивних відходів ядерної установки в цілому.

На базі проведених досліджень розроблене і впроваджене врахування глибини вигоряння для палива реакторів ВВЕР-1000 при обґрунтуванні ядерної безпеки завантаження контейнерів сухого сховища ВЯП (ССВЯП) ВКЗ-ВВЕР на Запорізькій АЕС та врахування глибини вигоряння палива реакторів РВПК-1000 при обґрунтуванні ядерної безпеки сховища СВЯП-1 Державного спеціалізованого підприємства "Чорнобильська АЕС".

Ключові слова: вигоряння палива, критичність, зберігання, ізотопний склад, аналіз безпеки.

ABSTRACT

Bilodid I. Scientific and Technical Principles for Decreasing the Conservatism in Safety Analysis of Nuclear Installations. - Manuscript.

Thesis for a PhD degree in technical sciences by specialty 05.14.14 "Thermal and Nuclear Power Plants" (143 "Nuclear energetics"). The work was carried out at the State Enterprise "State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety" of the State Inspectorate for Nuclear Regulation of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine. Protection will be held at Specialized Academic Council of Institute for NPP Safety Issues, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2018.

The thesis focuses on safety justification of VVER-440, VVER-1000 and RBMK-1000 spent fuel management systems, considering changes in the multiplication properties of nuclear fuel during operation without reduction in the level of nuclear safety.

The approach according to which nuclear fuel in the nuclear safety analysis of spent fuel management systems is considered "fresh" is excessively conservative since it does not account for the decrease in the multiplication properties of nuclear fuel during irradiation in the reactor core as the concentration of fissile material reduces and neutron-absorbing isotopes accumulate. Despite the fact that this approach significantly simplifies the nuclear safety analysis, its excessive conservatism, in view of the need to meet the requirement of Ukrainian regulations to ensure that the neutron multiplication factor is not higher than 0.95, leads to a significant reduction in the allowable amount of spent fuel that can be loaded into a container, cask or storage facility and, as a result, to increased costs associated with ensuring safety of the spent fuel management systems. As a way out of this situation, the presented principles for using fuel burnup as a parameter of nuclear safety were developed and implemented.

The burnup credit in the nuclear safety justification leads to reduction in the required amount of absorber in the storage and transport systems, which in turn leads to reduction in the cost of the facility. On the other hand, burnup credit allows increasing the allowable amount of fuel in a container or storage facility without

reducing the safety level, which reduces the handling cost per fuel assembly and the amount of radioactive waste for the nuclear installation as a whole. This is especially important now in connection with the adopted program for ensuring long-term storage of spent nuclear fuel.

The main objective of developing the scientific and technical principles for burnup credit is to justify the safety of spent fuel management systems without reducing the achieved safety level through more realistic account for the isotope composition of spent nuclear fuel.

The results of the thesis can lead to the following conclusions:

1. For the first time, scientific and technical principles for taking into account the fuel burnup in the nuclear safety analysis of spent fuel management systems for VVER and RBMK reactors in Ukraine have been developed.
2. The developed approach allows the use of average fuel operating parameters in a reactor without simulating the irradiation of each fuel assembly.
3. For the first time, the effect of irradiation and process characteristics of VVER and RBMK nuclear fuel on its isotopic composition and multiplication properties during storage depending on the burnup has been comprehensively studied.
4. For the first time, the conservative, in terms of multiplication properties of fuel management systems, isotopic composition of VVER-1000 and RBMK-1000 spent fuel, has been defined and can be used for safety justification.
5. For the first time, the conservative spatial distribution of burnup in VVER-1000 and RBMK-1000 spent nuclear fuel has been determined and justified to ensure conservatism of criticality assessments of spent fuel management systems required by Ukraine's regulatory documents.
6. For the first time, the applicability of the chosen list of isotopes and burnup distribution for their credit in the criticality calculations has been justified.

The results of the thesis were used in the nuclear safety justification of the spent nuclear storage system at the Zaporizhzhya NPP for VVER-1000 fuel, which allowed the nominal loading of spent fuel containers to be reached and the need for additional absorbers to be reduced, and were used for ISF-1 of Chernobyl NPP for RBMK-1000 fuel, which allowed the fuel to be removed from the reactor pools of Chernobyl NPP units in time and decommissioning of the Chernobyl NPP to be continued (appropriate acts are given in appendixes to the thesis). In addition, an appendix to the thesis provides a reference from the Ukrainian nuclear regulatory authority regarding the significant contribution of the developed principles to nuclear industry.

Keywords: fuel burnup, criticality, storage, isotopic composition, safety analysis.

АННОТАЦИЯ

Белодед Е. И. Научно-технические основы снижения избыточного консерватизма при анализе безопасности ядерных установок. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 "Тепловые и ядерные энергоустановки" (143 "Атомная энергетика"). Работа выполнена в Государственном предприятии "Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности" Государственной инспекции ядерного регулирования Украины и Национальной академии наук Украины. Защита состоится в специализированном ученом совете Института проблем безопасности атомных электростанций НАН Украины, г.Киев, 2018.

Диссертация посвящена обоснованию безопасности систем обращения с отработавшим топливом реакторов ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и РБМК-1000 с учетом изменения размножающих свойств ядерного топлива в результате эксплуатации без снижения уровня ядерной безопасности.

Разработаны и внедрены научно-технические основы использования глубины выгорания ОЯТ как фактора безопасности при анализе безопасности систем обращения с отработавшим топливом реакторов ВВЭР и РБМК для снижения избыточного консерватизма, присущего подходу, при котором все топливо считается свежим. Это позволяет более реально оценить размножающие свойства облученного топлива и, исходя из этого, максимально заполнить систему обращения с топливом и уменьшить необходимое количество дополнительных поглотителей для поддержания регламентированного уровня подкритичности. Благодаря этому снижается стоимость обращения с ТВС и количество радиоактивных отходов ядерной установки в целом.

На основе проведенных исследований разработан и внедрен учет глубины выгорания для топлива реакторов ВВЭР-1000 при обосновании ядерной безопасности загрузки контейнеров сухого хранилища ОЯТ (СХОЯТ) ВКХ-ВВЭР на Запорожской АЭС и учета глубины выгорания топлива реакторов РБМК-1000 при обосновании ядерной безопасности хранилища ХОЯТ-1 Государственного специализированного предприятия "Чернобыльская АЭС".

Ключевые слова: выгорание топлива, критичность, хранение, изотопный состав, анализ безопасности.